EFEITO DE DOSES CRESCENTES DE COBRE NO ESTADO NUTRICIONAL ENTRE MUDAS DE CUPUAÇUZEIRO

OLIVEIRA,Carlos Antonio Marinho Mendonça[1]; MELO, Giselly Carime Diniz [2]; NASCIMENTO, Julyana Beatriz Cirino [3] ;CARVALHO, Yasmim Neves Ferreira [4] ;MELO, Gustavo Queiroz[5] SOUZA, Gerlane, da Silva[6]

[1]Universidade Estadual Paulista, Jabuticabal – carlos.mendonca@unesp.br; [2] Universidade Federal Rural da Amazônia – gisellydiniz.ufra@gmail.com ; [3]Universidade Federal Rural da Amazônia julybnasc@gmail.com; [4] Universidade Federal Rural da Amazônia –yasyasferreiraa@gmail.com ; [5] Universidade Federal Rural da Amazônia – gustavoqueiroz3881@gmail.com ; [6] Universidade Federal Rural da Amazônia – gerlanesouza46@gmail.com

RESUMO

A árvore cupuaçu (Theobroma grandiflorum), cultivada principalmente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, possui significativa importância econômica, especialmente para pequenos produtores. Com o aumento da demanda, as pesquisas sobre melhoramento genético e práticas agrícolas têm se intensificado, e o cultivo do cupuaçu se expandiu com o uso de tecnologias modernas. O estudo conduzido na Embrapa Amazônia Oriental, em Belém-PA, avaliou os efeitos de doses crescentes de cobre (Cu) em duas progênies de cupuaçu. O experimento foi conduzido em casa de vegetação com cinco doses de cobre: 0, 15, 30, 60 e 120 mg/kg de solo, analisando variáveis como desenvolvimento vegetativo e biomassa seca. O cobre é essencial para a fotossíntese e a respiração celular, mas em excesso pode ser tóxico para as plantas. A progênie 63 apresentou aumento nos níveis de Cu até uma dose crítica de 15 mg/kg, seguido por uma diminuição, indicando mecanismos regulatórios contra a toxicidade. A progênie 61, por outro lado, apresentou maior estabilidade, com um aumento gradual nos níveis de Cu nas folhas e raízes em doses mais elevadas, sugerindo maior eficiência na utilização e tolerância ao excesso de cobre. A progênie 63 teve dificuldades em translocar cobre para o caule em altas doses, enquanto a progênie 61 apresentou uma resposta fisiológica mais dinâmica,permitindo a redistribuição do Cu por todas as partes da planta. Esses resultados indicam que a progênie 61 é mais adaptável e resistente ao estresse causado pelo acúmulo de Cu, enquanto a progênie 63 é mais sensível à toxicidade, o que pode prejudicar seu desenvolvimento a longo prazo. Em doses excessivas, o cobre pode afetar a lignificação do caule, causando danos ao crescimento e à estabilidade da planta.

Palavras-Chave: toxicidade; biomassa; progênies; plântulas.

INTRODUÇÃO

O cupuaçuzeiro (*Theobroma grandiflorum*) pertencente à família Malvaceae, é cultivado principalmente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, sendo de grande importância econômica para pequenos produtores e comunidades tradicionais. Sua produção é essencial para a geração de renda e sustentabilidade dessas populações (Limão, 2012; Pereira, Abreu & Rodrigues, 2018; Ramos et al., 2020; Cunha et al., 2021).

Os frutos do cupuaçuzeiro são amplamente utilizados na indústria alimentícia, principalmente na produção de sucos, polpas, doces e geleias (Genovese & Lannes, 2009). Devido ao crescente interesse econômico por essa cultura, as pesquisas voltadas para o melhoramento genético e desenvolvimento de práticas agrícolas mais eficientes se tornaram cada vez mais relevantes (Ferraz dos Santos et al., 2022; Clement et al., 2024).

Historicamente, o cultivo do cupuaçuzeiro era limitado a pequenos pomares e hortas caseiras, com métodos de cultivo passados de geração em geração (Vieira et al., 2022). No entanto, com a crescente demanda no Brasil e no mercado internacional, tornou-se necessário aprimorar as práticas agrícolas, visando atender à crescente demanda por produtos de qualidade. A adoção de novas tecnologias agrícolas e o aproveitamento do conhecimento tradicional dos produtores têm impulsionado a produção e permitido a expansão do mercado, especialmente no cenário internacional (Franklin &

Nascimento, 2020; Clement et al., 2024; Alves et al., 2024).

A nutrição mineral adequada é crucial para a produtividade agrícola, com os micronutrientes desempenhando papéis fundamentais no desenvolvimento das plantas. O cobre (Cu), embora necessário em quantidades pequenas, é essencial para várias funções fisiológicas, como fotossíntese, respiração celular, transporte de elétrons e formação das paredes celulares (Jatav et al., 2020; Tavanti et al., 2021). No entanto, quando presente em excesso, o cobre pode causar toxicidade, prejudicando o crescimento das raízes e a absorção de outros nutrientes essenciais (Yruela, 2009). Em doses excessivas, ele pode induzir estresse oxidativo e reduzir a capacidade de absorção de água e nutrientes, afetando negativamente o desenvolvimento das plantas (Souza et al., 2016).

Pesquisas demonstram que o manejo adequado de cobre em cultivos agrícolas é fundamental para melhorar a produtividade, mas seu excesso pode levar a danos fisiológicos significativos. Estudos com diferentes cultivos, incluindo o de Theobroma grandiflorum, indicam que as plantas podem acumular cobre nas raízes como estratégia de armazenamento,mas em níveis elevados, isso pode prejudicar o crescimento radicular e afetar a absorção de nutrientes (Lombardi & Sebastiani, 2005; Yruela, 2009).

A definição das doses ideais de cobre ainda é um tema de debate, especialmente considerando os potenciais efeitos negativos da sobrecarga desse nutriente nas plantas. A compreensão detalhada da interação entre o cobre e os mecanismos fisiológicos do cupuaçuzeiro é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficazes.

Nesse contexto, o objetivo deste estudo é analisar os efeitos das doses crescentes de cobre no desenvolvimento e nutrição de plantas jovens de cupuaçuzeiro, com foco na quantificação dos teores de nutrientes nas folhas, caules e raízes.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Embrapa Amazônia Oriental, em Belém-PA, em uma casa de vegetação de 100 m², sob clima do tipo Afi, com temperatura média anual de 26°C. Foram utilizadas as progênies 61 e 63 de cupuaçuzeiro, provenientes do programa de melhoramento genético da instituição. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5 × 2, combinando cinco doses de cobre (Cu) e duas progênies, totalizando 10 tratamentos com cinco repetições cada.

As soluções nutritivas foram preparadas separadamente para macro e micronutrientes, aplicadas em volumes precisos de 20 mL por muda. As doses de cobre variaram de 0 a 120 mg kg^{-1} de solo, distribuídas nos tratamentos T1 a T5. As mudas foram cultivadas em sacos de polietileno de 4 kg, recebendo irrigação controlada, controle manual de pragas e remoção de plantas daninhas. A aplicação dos nutrientes iniciou-se aos 85 dias após o plantio, com avaliações mensais de altura, diâmetro do caule, área foliar, número de folhas e massas secas dos diferentes órgãos ao longo de 171 dias.

Ao final do experimento, aos 256 dias após o plantio, as plantas foram coletadas e separadas em raízes, caules e folhas. O material foi seco em estufa a 70°C por 72 horas e posteriormente pesado para quantificação da biomassa seca. Em seguida, as amostras foram moídas, identificadas e enviadas para análise nutricional em laboratório especializado.Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste SNK a 5% de significância utilizando o software Sisvar, permitindo avaliar os efeitos das diferentes doses de cobre no desenvolvimento e na composição nutricional das progênies estudadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

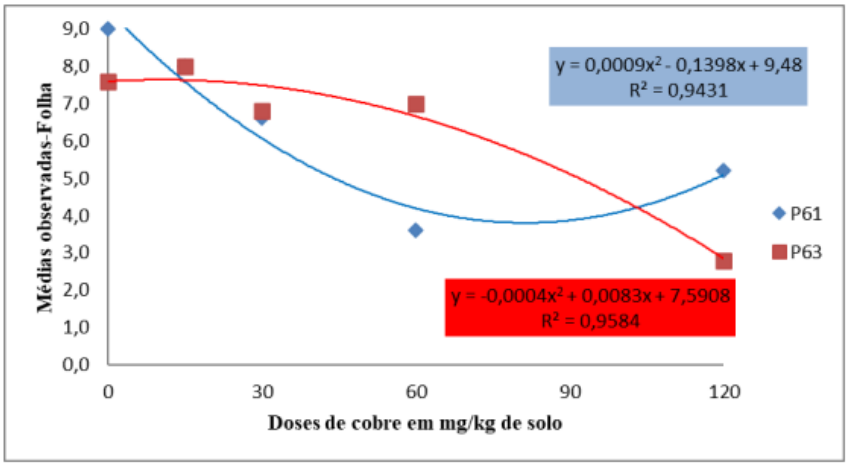
Os resultados mostram que as progênies 61 e 63 do cupuaçuzeiro responderam de maneira distinta às doses crescentes de cobre. A progênie 63 apresentou aumento acentuado no teor foliar do micronutriente até 15 mg kg^{-1}, seguido de leve redução, indicando alta capacidade inicial de absorção, porém com mecanismos de regulação que evitam acúmulo excessivo. Já a progênie 61 respondeu de forma mais estável, com menor variação e acúmulo gradual, sugerindo maior eficiência fisiológica na utilização e redistribuição do cobre, reduzindo riscos de toxicidade.

A redução nos teores foliares após determinado ponto em ambas as progênies sugere ativação de mecanismos fisiológicos de defesa contra excesso de cobre, como limitação da absorção radicular, competição iônica no solo ou complexação do metal dentro da planta. Esses processos evitam que

concentrações tóxicas sejam translocadas para os tecidos foliares.

A progênie 63 apresentou um padrão típico de toxicidade: aumento até o limite crítico e posterior declínio, demonstrando sensibilidade a níveis mais altos do micronutriente. Em contraste, a progênie 61 mostrou resposta mais dinâmica, com declínio inicial seguido de novo aumento dos teores foliares em doses superiores, o que indica maior plasticidade fisiológica.

Figura 1 - Equações de regressão para os teores de Cu nas folhas das progênies 61 e 63 de cupuaçuzeiro em função das doses de Cu aplicadas.



Fonte: Autor (2025)

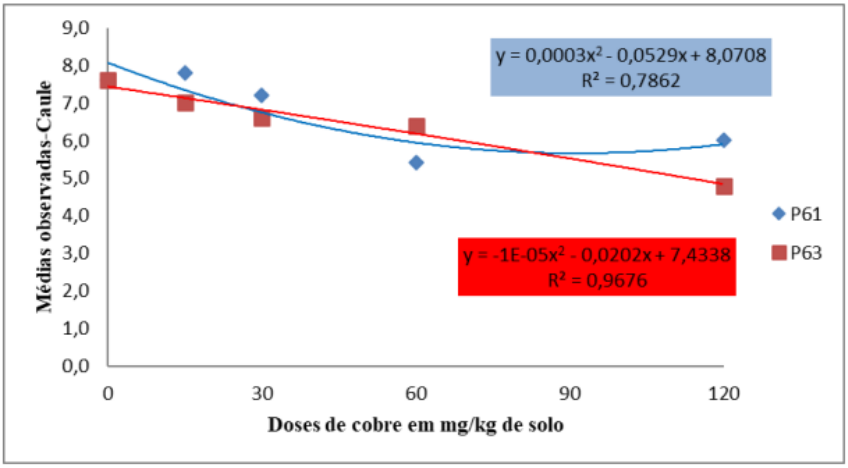
Os resultados da Figura 2 mostram que os teores de cobre no caule das progênies 61 e 63 diminuem com o aumento das doses aplicadas, ajustando-se a um modelo polinomial quadrático. Na progênie 63, essa redução é contínua, sugerindo limitação na translocação do cobre para o caule, possivelmente por retenção nas raízes ou ativação de mecanismos de exclusão que evitam o acúmulo do metal nos tecidos aéreos como forma de defesa contra a toxicidade.

A progênie 61 apresentou comportamento distinto: embora inicialmente também apresente queda nos teores de Cu no caule, há posterior aumento em doses elevadas. Esse padrão indica menor restrição ao transporte do micronutriente, revelando um ajuste fisiológico que permite redistribuição do cobre após determinado nível de absorção. Essa resposta sugere maior capacidade adaptativa frente ao excesso de Cu.

Na progênie 63, a redução contínua na translocação para o caule reforça sua maior sensibilidade ao estresse por cobre, o que pode comprometer o desenvolvimento estrutural da planta, conforme relatado por estudos anteriores. Como o cobre é essencial à lignificação, mas em excesso gera espécies reativas de oxigênio e danos oxidativos, a queda persistente dos teores no caule reforça a vulnerabilidade dessa progênie.

Assim, as diferenças entre as progênies indicam contrastes importantes em tolerância ao cobre: enquanto a progênie 61 demonstra mecanismos mais eficientes de regulação e redistribuição, a progênie 63 apresenta limitações fisiológicas que intensificam os efeitos tóxicos em doses elevadas .A redução no desenvolvimento do caule pode comprometer significativamente a produção do cupuaçuzeiro, uma vez que afeta a estabilidade da planta e sua capacidade de sustentação da copa. Além disso, caules enfraquecidos podem ser mais suscetíveis à infecção por patógenos fúngicos e bacterianos, que tendem a se proliferar em plantas sob estresse por metais pesados (Gomes *et al.,* 2017).

Figura 2 - Equações de regressão para os teores de Cu no caule das progênies 61 e 63 de cupuaçuzeiro em função das doses de Cu aplicadas.



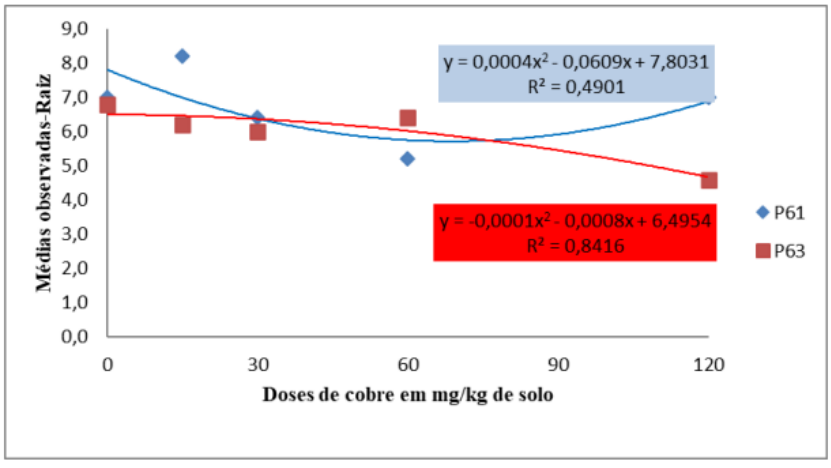
Fonte: Autor (2025)

Os resultados da Figura 3 mostram respostas contrastantes entre as progênies 61 e 63 de cupuaçuzeiro frente ao aumento das doses de Cu nas raízes. Na progênie 63, os teores de Cu diminuíram com o incremento das doses, ajustando-se a um modelo quadrático. Isso indica que, embora inicialmente ocorra acúmulo do metal nas raízes, em doses elevadas a planta ativa mecanismos de regulação para evitar o excesso, reduzindo a absorção ou redistribuindo o Cu para outras partes da planta, como estratégia de proteção contra toxicidade radicular.

A progênie 61 apresentou padrão semelhante apenas nas doses iniciais, com redução dos teores de Cu. A partir de 60 mg kg^{-1}, contudo, ocorreu recuperação e aumento progressivo do Cu nas raízes, sugerindo maior capacidade adaptativa. Essa resposta pode refletir a ativação de mecanismos fisiológicos de tolerância, como compartimentalização do metal em vacúolos e síntese de compostos quelantes, reduzindo danos por estresse oxidativo e evitando que o excesso de Cu seja translocado para os tecidos aéreos.

De forma geral, o excesso de Cu é conhecido por afetar negativamente o sistema radicular, reduzindo crescimento, absorção de água e nutrientes e promovendo danos celulares por ROS, conforme relatado por Lombardi & Sebastiani (2005). No entanto, as respostas da progênie 61, somadas a achados de estudos como Souza et al. (2016) e Silva et al. (2023), evidenciam que algumas plantas podem desenvolver estratégias eficientes para mitigar os efeitos tóxicos do metal, assegurando a continuidade do desenvolvimento mesmo em condições de elevada disponibilidade de Cu no solo.

Figura 3 - Equações de regressão para os teores de Cu na raiz das progênies 61 e 63 de cupuaçuzeiro em função das doses de Cu aplicadas.



Fonte: Autor (2025)

CONCLUSÃO

A avaliação das duas progênies de cupuaçuzeiro (P61 e P63) com relação às doses de Cu estudadas, indicou maior acúmulo na progênie P63 até uma dose crítica, seguido de redução nos teores, sugerindo mecanismos de regulação contra a toxicidade. A progênie P61 mostrou maior capacidade adaptativa, com aumento nos teores de Cu nas folhas e raízes após doses mais altas, indicando tolerância ao metal.

REFERÊNCIAS

ALVES, E. O.; FREITAS, C. B. S. de; OLIVEIRA, M. G. de; SILVA, M. da S. Genetic parameters and dissimilarity between progenies of 'cupuaçu' tree (Theobroma grandiflorum, Malvaceae) from free pollination in southeastern Pará, Brazil. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 30–36, 2024

ALVES, R. M.; FERREIRA, F. N. BRS Carimbó: Nova cultivar de cupuaçuzeiro da Embrapa Amazônia Oriental. Comunicado técnico, n 232. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 8 p. 2020. Barbosa Filho MP et al. (2002) Arroz, milho e trigo. Micronutrientes

BHAGAT, M. et al. Multifunctional Copper Nanoparticles: Synthesis and Applications. ECS Journal of Solid State Science and Technology, v. 10, n. 1, p. 1-11, 2021.

CERETTA, Carlos Alberto et al. Micronutrientes na soja: produtividade e análise econômica, Ciência Rural, Santa Maria, v.35, n.3, p.576-581, mai-jun, 2005 ISSN 0103-8478.

CLEMENT, C. R. et al. Finding the origin of domestication of cupuaçu requires more than genomics. SciELO (SciELO Preprints), 2024.

COSTA, D. L. P.; DE OLIVEIRA VIEIRA, I. C.; DE CARVALHO, E. D. O. T.; SILVA, M. Y. F.; VELAME, M. D. L. A. Produtividade e eficiência do uso da água de cupuaçuzeiro irrigado nas condições climáticas de Castanhal-PA, Amazônia Brasileira. IRRIGA, n. 27, v. 1, p. 1-15. 2022.

COSTA, Deborah Luciany Pires et al. Produtividade e eficiência do uso da água de Cupuaçuzeiro irrigado nas condições climáticas de Castanhal - PA, Amazônia brasileira. Irriga, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 1–15, 2022. DOI: 10.15809/irriga.2022v27n1p1-15.

COSTA, Magna. Micronutrientes na Agricultura / Magna Maria Macedo Nunes Costa. - Campina Grande : Embrapa Algodão, 2024 (44 p.) : il. color. – (Documentos / Embrapa Algodão, e-ISSN 2966-0343 ; 297).

CUNHA, E.; LIMA, G.; SALES, J.; OLIVEIRA, E. Determination of thermophysicalproperties of cupuassu (Theobroma grandiflorum) dry almonds.The Journal of Engineeringand Exact Sciences, v. 7, n. 2, p. 11955-01-12E, 2021.DOI: 0.18540/JCECVL7ISS2PP11955-01-12.

CUNHA-JUNIOR, J. B. D.; TAVARES, L. B. Fenologia do cupuaçuzeiro (Theobroma grandiflorum (Willd. ex. Spreng.) Schum.) em um sistema agroflorestal, submetido à diferentes 25 lâminas de irrigação no município de Castanhal, PA. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2020. Belém, PA, 2020.

DE OLIVEIRA, T. K.; DA SILVA, D. V.; BERKEMBROCK, J. Variabilidade espacial da produção e incidência de broca dos frutos em cupuaçuzeiro cultivado em consórcio agroflorestal. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais, 11., 2018. Aracaju. SAF's no Semiárido: consciência, inclusão, diversidade, oportunidade: anais. Aracaju: SBSAF: UFS: Embrapa, 2018.

FERRAZ DOS SANTOS, L. et al. Cupuassu (Theobroma grandiflorumWilld. ex Sprengel] Schumann) fruit development: Key genes involved in primary metabolism and stress response. Agronomy v. 12, p. 763, 2022.

FERRAZ, I. D. K.; CALVI, G. P. Teste de germinação. In: LIMA JÚNIOR, M. J. V. (Ed.) Manual de procedimentos de análise de sementes florestais. Londrina: Abrates, p. 5.1-5.36. 2011

. FERRAZ, I. D. K.; CALVI, G. P. Teste de germinação. In: LIMA JÚNIOR, M. J. V. (Ed.) Manual de procedimentos de análise de sementes florestais. Londrina: Abrates, p. 5.1-5.36. 2011.

FRANKLIN, B.; NASCIMENTO, F. D. C. A. Plants for the future: data compilation of

FRAZÃO, Dilson Augusto Capucho et al. Teores de nitrogênio, fósforo e potássio em cupuaçuzeiro cultivados em solução nutritiva com omissão de macronutrientes. In: Congresso Brasileiro de Fruticultura, Florianópolis: SBF, 2004. p. 55-60.18., 2004, Florianópolis. Tecnologia, competitividade, sustentabilidade: anais

MORAES, M. F.; ABREU JUNIOR, C. H.; LAVRES JUNIOR, J. Micronutrientes. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010, p. 207-278. MOREIRA, A. et al. Copper use efficiency in soybean cultivars. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 54, n. 1, p. 1-10, 2019.
MOREIRA, A.; MORAES, L. A. C.; SCHROTH, G. Copper fertilization in soybean–wheat intercropping under no–till management. Soil and Tillage Research, v. 193, n. 1, p. 133-141, 2019. MOTTALEB, S. A. et al. Are copper nanoparticles toxic to all plants? A case study on onion (Allium cepa L.). Agronomy, v. 11, n. 5, p. 1-18, 2021.
MULLER, C. H.; CARVALHO, J. E. U. Manejo da cultura do cupuaçuzeiro: produção de mudas, nutrição e adubação, sistemas de cultivo e tratos culturais. EMBRAPA/CPATU: Belém, 1997 nutritional composition of guavaboi, burity, cupuaçu, murici and peach palm.Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 3, p. 10174- 10189, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n3-046 PARK, Y. J. et al. Impact of copper treatment on phenylpropanoid biosynthesis in adventitious root culture of Althaea officinalis L. Preparative Biochemistry Biotechnology, v. 1, n. 1, p. 1-9, 2021.
PEREIRA, A.; ABREU, V.; RODRIGUES, S.Cupuassu—Theobroma grandiflorum. In:EXOTIC FRUITS. Academic Press, 2018. p. 159-162.
RAMOS, S. et al. Influence of pulpon the microbial diversity during cupuassu fermentation.International Journal of Food Microbiology, v. 318, p. 108465, 2020
RODRIGUES, J. D. B. Avaliação e seleção de progênies de cupuaçuzeiro (Theobroma grandiflorum Schum.) submetidas à inundação. Belém, 2016. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2016 SANTOS, J. O. et al. Copper (Cu) stress affects carbon and antioxidant metabolism in 'Coffea arabica' seedlings. Australian Journal of Crop Science, v. 11, n. 8, p. 960-967, 2017.
SILVA DA COSTA, R. et al. Thermoanalytical and phytochemical study of the cupuassu(Theobroma grandiflorumSchum.) seed by-product in different processing stages.Journal ofThermal Analysis and Calorimetry, v. 147, p. 275–284, 2022. DOI: 10.1007/s10973-020-10347-0